

Espectroscopia de refletância aplicada à caracterização de turmalinas gemológicas provenientes da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil

Paula Jussara Azevedo de Oliveira¹
Sandra de Brito Barreto¹
Thais Andressa Carrino¹
Aldine Maria de Lima Correia¹

¹ Departamento de Geologia/Centro de Tecnologia e Geociências/Universidade Federal de Pernambuco (DGEO/CTG/UFPE)
Av. da Arquitetura, s/n, 50740-550 – Recife-PE, Brasil
paula_jussara@hotmail.com; sandradebritobarreto@gmail.com; thais.carrino@gmail.com;
aldine.correia@gmail.com

Abstract. This article aims to evaluate the effectiveness of the reflectance spectroscopy technique applied to Gemology, focusing on the characterization of tourmalines related to pegmatites located in the Borborema Pegmatite Province, Northeast Brazil. Elbaite tourmalines (n=9) were analyzed and classified in four groups based on their colours: (i) green and blue, (ii) turquoise (Paraíba); (iii) red and purple; (iv) colourless. Reflectance spectroscopy data were obtained using FieldSpec™ (ASD) spectroradiometer, as well as, geochemical data, by electron microprobe analysis. Reflectance spectra were investigated visually, and absorption features were interpreted, and related to chromophore elements (Fe, Cu, Mn). The application of the continuum removal technique became possible the correlation between depth of absorption features in the VNIR range, and contents of chromophore elements. Specifically, samples marked by high CuO and FeO contents showed more intense depth of absorption features centered at 920 and 730 nm, respectively. Additionally, diagnostic absorption features of elbaïtes were identified in the SWIR range, and related to molecular vibrational processes (e.g., OH, H₂O, metal-OH). The results of this study show the applicability of the reflectance spectroscopy technique for characterizing tourmalines quickly, resulting in an initial spectral library. This spectral library will facilitate the characterization of other gemological tourmaline in the study region, including the possibility of estimating contents of determined elements.

Palavras-chave: FieldSpec, elbaïtas, Gemologia, feições de absorção, faixa VNIR-SWIR, FieldSpec, elbaïtes, Gemology, absorption features, VNIR-SWIR range.

1. Introdução

No estudo de minerais e rochas, o uso de técnicas espectroscópicas, que tem como princípio a interação da radiação eletromagnética (REM) com a matéria cristalina, é de grande importância para a aquisição de dados e caracterização desses materiais, devido à troca de energia a nível microscópico, dependendo do arranjo cristalino e da variação composicional dos mesmos (Hunt, 1977, Clark et al., 1990, Clark, 1999).

A variação composicional e a estrutura cristalina são critérios importantes para se explicar, por exemplo, a cor de diferentes minerais. Neste caso, a técnica de espectroscopia de refletância (ER) possui um papel de destaque para este tipo de estudo, visto ser um método não destrutivo e rápido (Clark, 1999). Aplicações corriqueiras da ER em mineralogia estão, principalmente, relacionadas com a identificação de minerais de alteração hidrotermal em diferentes sistemas metalíferos (e.g., epitermal, pórfiro), facilitando a determinação do zoneamento mineral, de paleotemperaturas e/ou paleocondutos (e.g., Thompson et al., 1999). Áreas à parte da prospecção metalífera ainda são pouco focadas pelo método da ER, a exemplo da prospecção de minerais gemológicos. Um dos primeiros trabalhos publicados direcionados a esta aplicação consiste em Martin et al. (1989), que apresentaram a técnica da ER aplicada à caracterização de berilo, granada, alexandrita entre outros minerais.

Outro exemplo estratégico de aplicação da técnica de ER em Gemologia abrange o estudo de turmalinas, algumas das quais são economicamente importantes (e.g., turmalina Paraíba). Observa-se, todavia, poucos trabalhos sistemáticos acerca da caracterização de turmalinas. Trabalho como o de Bierwirth (2008) objetivou a caracterização de turmalinas associadas

com mineralizações de ouro na região de Pilbara (Austrália). Este autor identificou as principais feições de absorção de turmalinas na faixa do visível ao infravermelho de ondas curtas, mostrando suas diferenças espectrais mediante a composição química de cada amostra. Zhang et al. (2008), por sua vez, empregaram o método da ER (entre outros) para a caracterização de diferentes tipos de turmalinas associadas a pegmatitos da região noroeste da China.

No Brasil, entretanto, um estudo comparativo de assinaturas espectrais de refletância de diferentes tipos de turmalinas ainda não foi realizada de forma sistemática e aprofundada, apenas de forma pontual (e.g., Silva, 2009).

Objetivando-se aplicar o método da ER e avaliar sua eficácia em estudos aplicados à Gemologia, este trabalho visa a caracterização de turmalinas do Nordeste do Brasil, combinando-se dados de ER com dados geoquímicos. As amostras de turmalinas investigadas são provenientes de pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema (PPB) (Beurlen et al., 2007), inserida na Província Borborema (Figura 1A). A PPB abrange parte dos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. Especificamente, os pegmatitos mineralizados em turmalinas compreendem os pegmatitos Batalha (PB), Bulandeira e Capoeiras (RN) que, em geral, são corpos centimétricos a métricos, caracterizados por variações composicionais da matriz granítica (Barreto, 1999), encaixados em muscovita quartzito da Formação Equador, Grupo Seridó (Figura 1B). As rochas supracrustais do Grupo Seridó (Formações Jucurutu, Equador, Parelhas, Seridó) possuem idade neoproterozoica e foram deformadas durante o Ciclo Brasileiro (cf., Silva, 2009).

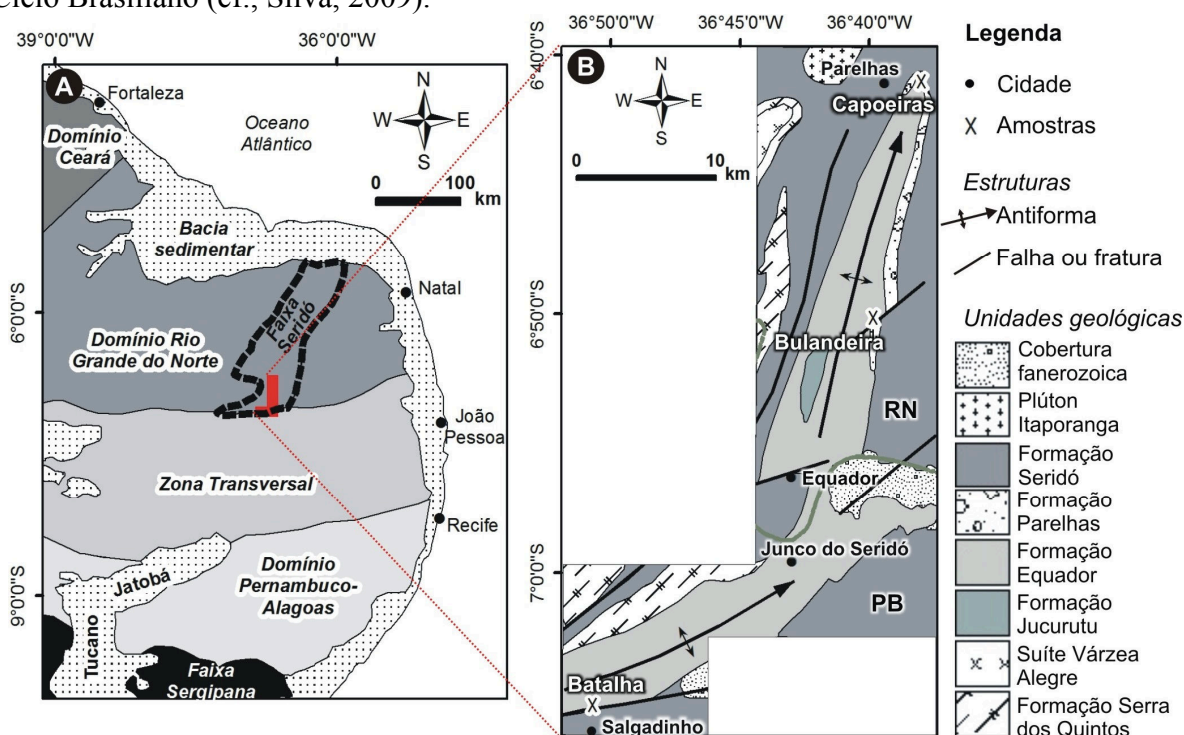


Figura 1. (a) Mapa regional da Província Borborema e, (b) mapa geológico da área dos pegmatitos portadores de turmalinas (modificado de Angelim et al., 2004 in Silva, 2009).

1.1 Turmalinas

Minerais do supergrupo da turmalina compreendem complexos silicatos de boro e alumínio, cristalizados no sistema trigonal e marcados por hábito, geralmente, prismático. São caracterizados por complexas variações composicionais e estruturas cristalinas, possuindo fórmula química geral $XY_3Z_6[T_6O_{18}][BO_3]_3V_3W$, onde $X = Na^+, K^+, Ca^{2+}, Pb^{2+}$, e vacância; $Y = Li^+, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Cu^{2+}, Al^{3+}, V^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{3+}, Mn^{3+}, Ti^{4+}$; $Z = Mg^{2+}, Fe^{2+}, Al^{3+}, V^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{3+}$; $T = Si^{4+}, B^{3+}, Al^{3+}$; $B = B^{3+}$; $V = OH^-, O^{2-}$; $W = OH^-, F^-, O^{2-}$ (Hawthorne e Dirlam, 2011).

Estas variações composicionais e de arranjos estruturais justificam a existência de variações de cores nestes minerais (e.g., rósea, vermelha, azul, verde, preta, incolores).

Espécies de turmalinas podem ser definidas com base na composição química e domínio de um determinado constituinte químico num sítio cristalográfico. Com base neste critério, aparecem o grupo alcalino (e.g., dravita, schorlita, elbaíta), o grupo cálcico (e.g., uvita), e grupo de vacância (e.g., foitita) (Hawthorne e Dirlam, 2011). Especificamente, o presente estudo foca na caracterização de turmalinas elbaítas que, composicionalmente, são retratadas pela fórmula geral $Na^Y(Li_{1,5}Al_{1,5})Al_6(Si_6O_{18})(BO_3)_3(OH)_3(OH)$, onde Y é o sítio cristalográfico ocupado tanto por Li quanto por Al (Hawthorne e Dirlam, 2011).

2. Materiais e métodos

Foram utilizadas nove amostras de turmalinas elbaítas, as quais foram separadas em quatro grupos de acordo com suas variações de cor, seguindo-se o trabalho de Barreto (1999) (Tabela 1): grupo verde e azul, verde turquesa (Paraíba), vermelho e púrpura, e cinza/incolores. Estas amostras compreendem material de pesquisa do Laboratório de Gemologia (LABGEM) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Tabela 1. Relação de amostras de turmalinas elbaítas, pegmatitos provenientes, cor, e teores médios de MnO, FeO, CuO e ZnO obtidos por microsonda eletrônica por Barreto (1999).

Amostra	Pegmatito	Cor	MnO (%)	FeO (%)	CuO (%)	ZnO (%)
B5VA	Bulandeira	Verde	1,593	3,334	0,000	0,028
C7A	Capoeiras	Azul	1,190	3,097	0,002<mdl	2,708
C4T		Verde turquesa (Paraíba)	1,909	0,291	1,360	0,063
C14T			0,354	0,007	1,480	0,027
B11R	Bulandeira	Vermelho	0,092	0,009	0,001	0,002
S27L	Batalha	Púrpura	0,943	0,000	0,665	0,020
S19C		Cinza/incolor	2,416	0,409	0,077	0,229
S20C			2,279	0,386	0,080	0,181

Concentrações em % em peso de óxido; mdl = method detection limit.

Dados de ER foram obtidos por meio do espectrorradiômetro FieldSpec™ *High-resolution*, da *Analytical Spectral Devices* (ASD), pertencente ao Laboratório de Geofísica Aplicada, do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Este instrumento é caracterizado por 2151 canais espectrais, abrangendo a faixa do visível ao infravermelho de ondas curtas (350 – 2500 nm). Foi empregada uma sonda manual portadora de uma lâmpada halógena e, para a calibração, foi usada uma placa de referência *Spectralon*. Para cada amostra analisada, foram realizadas entre 2 e 6 medidas de refletância, variando-se a posição das faces dos cristais.

Dados de química mineral foram obtidos por Barreto (1999) por meio do uso de microsonda eletrônica CAMECA SX50, do Serviço Científico-Técnico da Universidade de Barcelona. Foi utilizado um padrão interno produzido por Barreto (1999), a fim de assegurar maior precisão analítica. Somente a amostra B4VA (Bulandeira) não possui dados associados.

Fotografias das amostras foram feitas através do emprego de câmera digital Canon EOS 1100D acoplada a um microscópio gemológico Scheneider, modelo Stemi 2000-C, ambos pertencentes ao LABGEM da UFPE.

Com relação aos dados de ER, foi obtida a média de curvas espectrais de refletância de cada amostra, a fim de proceder à interpretação das principais feições de absorção diagnósticas de cada tipo de turmalina. Adicionalmente, também foi aplicada a técnica da remoção do contínuo para realçar e quantificar a profundidade das mesmas (van der Meer, 2004). Gráficos do tipo profundidade da feição de absorção (após a remoção do contínuo)

versus teor elementar foram gerados, especificamente, para feições diagnósticas de elementos cromóforos como Cu^{2+} e Fe^{2+} , a fim de averiguar o papel da técnica da ER na estimativa de elementos químicos chaves à determinação de cores de turmalinas gemológicas.

3. Resultados e discussão

A partir da média das curvas espectrais de refletância medidas em cada amostra de turmalina, foram identificadas as principais feições de absorção na faixa do visível-infravermelho próximo (VNIR) e na faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR), como se observa na Figura 2. A investigação da relação da profundidade de feição de absorção associada a determinados metais de transição (cromóforos) e o teor elementar foi realizada em amostras com maiores teores de CuO e FeO . Esta relação está apresentada nos gráficos da Figura 3.

3.1 Feições de absorção na faixa do visível ao infravermelho próximo

Nessa faixa do espectro, que compreende ~350-1200 nm, encontram-se feições de absorção características de cada grupo das elbaítas analisadas (Figura 2).

No grupo verde (B4VA e B5VA) e azul (C7A), que abrange turmalinas ricas em ferro ($\text{FeO} > 3\%$; cf. Tabela 1), as amostras de turmalinas apresentam duas amplas feições de absorção em ~720 nm e ~1120 nm, derivadas do processo de transição eletrônica (transição d-d) de Fe^{2+} (Mattson e Rossman, 1987; Merkel e Breeding, 2009). Algumas amostras são marcadas por sutil feição em ~499 nm, associada com Fe^{2+} , e em ~460 nm, relacionada com íon Fe^{3+} (Merkel e Breeding, 2009). As amostras também são caracterizadas por teores consideráveis de Mn (1,19-1,91%), sendo a principal feição de absorção relacionada encontrada em ~415 nm, e associada com processo de transição eletrônica de íon Mn^{2+} (Merkel e Breeding, 2009). Particularmente, a amostra de cor azul (C7A), em relação às amostras de coloração verde, é marcada também por altos teores de Zn (~2,7%). Barreto (1999) atribui à presença de Zn um possível papel relevante para se explicar a cor azul, além das típicas feições de Fe^{2+} .

No grupo de turmalinas Paraíba (amostras C4T, C14T), a cor verde turquesa é explicada por feição de absorção profunda em 519 nm, associada a processos de transição eletrônica do íon Mn^{3+} (transição d-d) que ocupa o sítio octaédrico da estrutura deste mineral (Manning, 1969, 1973, Rossman et al., 1991), e por feição centrada em ~400-415 nm, possivelmente relacionada com transição eletrônica de Mn^{2+} (Merkel e Breeding, 2009). Estas turmalinas são caracterizadas por elevados teores de cobre (1,36-1,48%; cf. Tabela 1), aparecendo outras feições de absorção em ~700 e em ~922-1022 nm, que são amplas e relacionadas com Cu^{2+} (Rossman et al., 1991; Barreto, 1999; Merkel e Breeding, 2009).

Amostras de turmalinas vermelha (B11R) e púrpura (S27L) são marcadas por teores consideráveis de Mn (~0,09-0,94%), e por feição de absorção centrada em ~520 nm, que é derivada do processo de transição eletrônica do íon Mn^{3+} , além da feição em ~415 nm, atribuída a Mn^{2+} . Especificamente, a amostra S27L apresenta teores médios de cobre (0,665%), havendo duplas feições de absorção relacionadas com o processo de transição d-d de íon Cu^{2+} em 701 e 921 nm. Sutis feições em 696 nm e em ~950-1120 nm também são verificadas na amostra B11R, e estão associadas com processos de transição eletrônica de Mn^{3+} (Taran et al., 1993; Reinitz e Rossman, 1988).

Segundo Barreto (1999), as amostras do grupo cinza/incolor possuem, como possíveis cromóforos, o Cu, Fe, e Mn. Nas amostras S20C e S19C (Figura 2), foram identificadas amplas feições de absorção em ~720 e ~1120 nm, relacionadas com processo de transição eletrônica do íon Fe^{2+} . As feições em cerca de 536 nm podem ser atribuídas a processo de transferência de carga de Fe^{3+} (Zhang et al., 2011), e a feição centrada em ~400 nm, a processos de transição eletrônica de íon Mn^{2+} (Barreto, 1999).

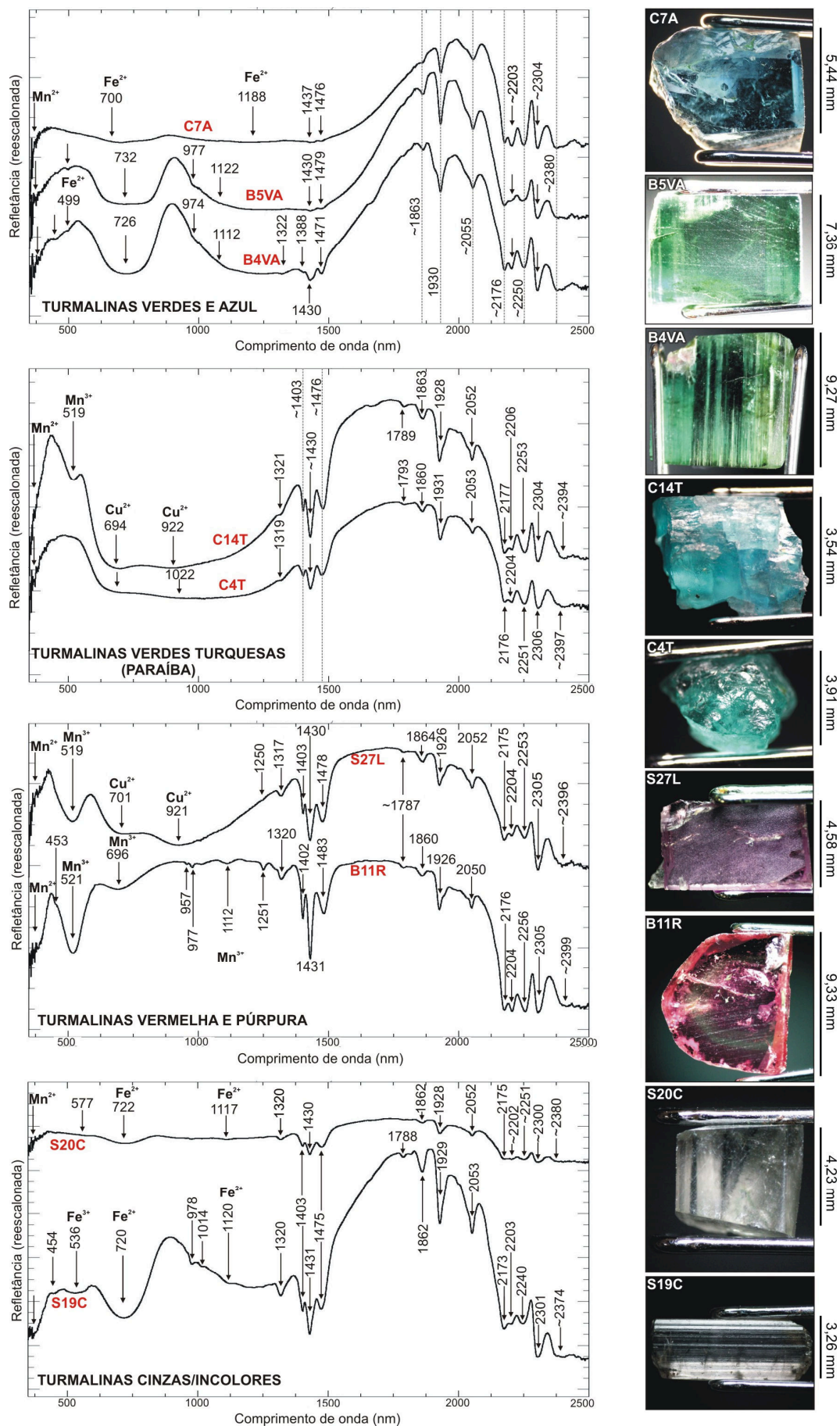


Figura 2. Curvas espectrais de refletância e fotografias das amostras de turmalinas estudadas.

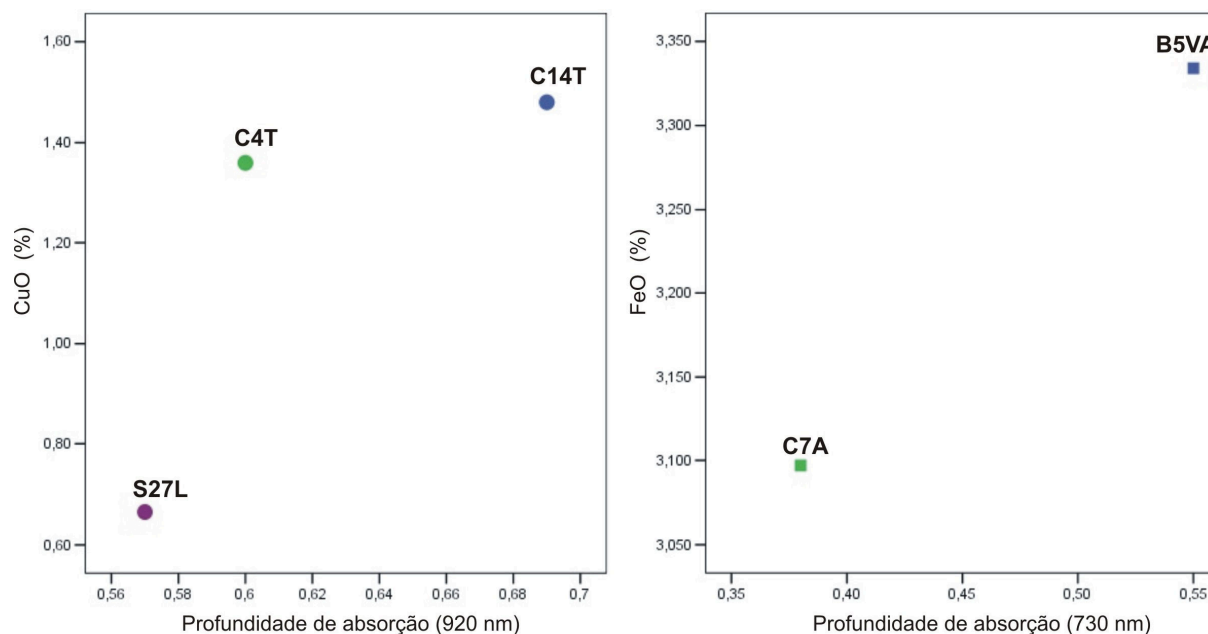


Figura 3. Gráficos de profundidade de absorção em 920 nm *versus* teores de CuO, e de profundidade de absorção em 730 nm *versus* teores de FeO.

3.2 Feições de absorção na faixa do infravermelho de ondas curtas

De forma geral, na faixa espectral do infravermelho de ondas curtas, aparecem feições de absorção vibracionais profundas e bem definidas em todas as elbaítas investigadas, com poucas variações da posição e forma das feições entre as amostras (Figura 2).

Destacam-se as feições entre ~1403 e ~1478 nm, associadas com vibração molecular de água e hidroxila (Clark et al., 1990), e em ~1930 nm, exclusiva da molécula de água presente nas estruturas de todas as turmalinas, o que é corriqueiramente observado em turmalinas associadas com pegmatitos (Mingsheng e Houyu, 1995; Zhang et al., 2011). De acordo com Bierwirth (2008), as feições em ~1860 e em ~2050 nm também parecem estar relacionadas com processos de vibração de moléculas de água.

Cinco feições de absorção entre ~2100 e ~2500 nm, típicas de elbaítas (cf., Bierwirth, 2008), são observadas nas turmalinas investigadas. Estas feições são derivadas de processos de vibração molecular do tipo OH e metal-OH (Bierwirth, 2008, Zhang et al., 2011). Especificamente, de acordo com Zhang et al. (2011), a feição de absorção em cerca de 2200 nm é gerada por processos vibracionais da ligação Al-OH (cf., Clark et al., 1990), e feições em aproximadamente 2250 e 2390 nm, provavelmente, estão associadas com ligações do Al-OH e B-OH. A feição de absorção centrada em ~2170 nm nas elbaítas deve retratar vibração de Mn-OH, fato que é condizente com as amostras de turmalinas estudadas, já que todas são marcadas por teores consideráveis de Mn (0,092 a 2,416% - cf., Tabela 1). A presença de Mn em elbaítas também é levada em conta para explicar feições de absorção em ~1250 e ~1320 nm (Bierwirth, 2008). Observa-se, na Figura 2, que estas duas feições são bem marcadas nas amostras de turmalinas vermelha (B11R) e púrpura (S27L), enquanto que a feição em ~1320 nm aparece em todas as amostras de turmalinas investigadas.

É interessante observar também que turmalinas ricas em ferro (amostras verdes e azul - B4VA, B5VA, C7A), são as únicas caracterizadas por feições de absorção sutis no início da faixa do infravermelho de ondas curtas. Isto ocorre em função da intensa absorção provocada por ferro na faixa do visível ao infravermelho próximo, que acaba mascarando as respostas das feições vibracionais na faixa de ~1300-1500 nm (Figura 2). Este padrão espectral é típico de minerais ricos em ferro, caso de outros silicatos, como os minerais do grupo da clorita (Pontual et al., 2008).

3.3 Relação de profundidade de feição de absorção e teor elementar

A análise inicial da relação de profundidade de feição de absorção de Cu^{2+} e Fe^{2+} versus teores obtidos por microsonda eletrônica foi feita para as amostras com alto teores de CuO (C14T, C4T e S27L) e FeO (B5VA e C7A). Após a aplicação da técnica da remoção do contínuo nas curvas espectrais de refletância, as feições diagnósticas de Cu^{2+} e Fe^{2+} , centradas, respectivamente, em 920 nm e 730 nm, foram medidas quanto à profundidade, e comparadas com os teores elementares obtidos por Barreto (1999) (cf. Tabela 1).

Os gráficos obtidos e mostrados na Figura 3 revelam um claro padrão para estudos composicionais associados a elementos cromóforos de turmalinas usando-se a técnica da ER: observa-se que quanto maior o teor dos elementos cromóforos (Cu e Fe) das amostras selecionadas, maior é a profundidade das feições de absorção geradas por processos de transição eletrônica de íons Cu^{2+} e Fe^{2+} .

4. Conclusão

Diante dos resultados e do que foi observado ao longo deste estudo, comprova-se a eficácia do método da ER para a caracterização da composição química das turmalinas gemológicas em conjunto com dados geoquímicos, visto que, através das feições de absorção identificadas e da relação de profundidade de feição de absorção e teor elementar, constatou-se a presença de determinados elementos cromóforos das amostras estudadas e uma compatibilidade com os resultados de outros estudos aqui citados. A satisfatoriedade dos resultados encontrados e a eficácia do método resultaram na composição de um banco de dados (biblioteca espectral) inicial que deverá ser expandido conforme novas amostras e análises químicas foram sendo obtidas. Esta biblioteca espectral, em especial, possui um papel chave em estudos de prospecção de gemas, uma vez que facilita a rápida identificação e classificação de outras turmalinas gemológicas da região, incluindo-se a possibilidade de estimar teores elementares.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Museu de Minerais e Rochas e ao Laboratório de Geomologia do Departamento de Geologia da UFPE pela infraestrutura, e ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, em especial, à Prof^a. Dra. Adalene M. Silva, pelo acesso ao espectrorradiômetro FieldSpec™.

6. Referências

Angelim, L.A.A.; Vasconcelos, A.M.; Gomes, J.R.C.; Wanderley, A.A.; Forgiarini, L.L.; Medeiros, M. de F. Folha SB-24-Jaguaribe. In: Schobbenhaus, C.; Gonçalves, J.H.; Santos, J.O.S.; Abram, M.B.; Leão Neto, R.; Matos, G.M.M.; Vidotti, R.M.; Ramos, M.A.B. (Eds.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**, SIG. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM, 2004.

Barreto, S.B. **Caracterização química, óptica e estrutural das turmalinas geomológicas dos pegmatitos Capoeiras, Quintos, Bulandeira e Batalha, Província Pegmatítica Boborema, Nordeste do Brasil**, 1999. 561p. Tese (Doutorado em Geologia) - Departament de Cristal'lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, 1999.

Beurlen, H.; Barreto, S.; Martin, R.; Melgarejo, J.; Silva, M.R.R.; Souza Neto, J.A. The Boborema Pegmatite Province in Northeast Brazil: the state of the art. In: Granitic Pegmatites International Symposium, 2007, Porto. **Anais...** Porto: PEG2007, 2007. Papers, 3p.

Bierwirth, P.N. Laboratory and imaging spectroscopy of tourmaline - a tool for mineral exploration. In: Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference (ARSPC), 14., 2008. **Anais...** Darwin: 2008. Papers, 12p.

Clark, R.N. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz, A.N. (Ed.). **Manual of remote sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Science**. New York: John Wiley and Sons, 1999, p 3- 58.

Clark, R.N.; King, T.V.V.; Klejwa, M.; Swayze, G. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. B8, p. 12653-12680, 1990.

Hawthorne, F.C.; Dirlam, D.M. Tourmaline the indicator mineral: from atomic arrangement to viking navigation. **Elements**, v. 7, n. 5, p. 307-312, 2011.

Hunt, G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. **Geophysics**, v. 42, n. 3, p. 501-513, 1977.

Manning, P.G. Optical absorption spectra of chromium-bearing tourmaline, black tourmaline and buergerite. **Canadian Mineralogist**, v. 10, n.1, p.57-70, 1969.

Manning, P.G. Effect of second-nearest-neighbour interaction on Mn^{3+} absorption in pink and black tourmalines, **Canadian Mineralogist**, v. 11, p. 971-977, 1973.

Martin, F.; Mérigoux, H.; Zecchini, P. Reflectance infrared spectroscopy in geomology. **Gems & Gemology**, v. 25, n. 4, p. 226-231, 1989.

Mattson, S. M.; Rossman, G.R. Fe^{2+} - Fe^{+3} Interactions in Tourmalines. **Physics and Chemistry of Mineral**, v.14, n. 2, p. 163-171, 1987.

Merkel, P.B.; Breeding, C.M. Spectral differentiation between copper and iron Colorants in gems tourmalines. **Gems & Gemology**, v. 45, n. 2, p. 122-119, 2009.

Mingsheng, P.; Houyu, W. A study on the vibrational spectra of water in tourmaline. **Acta Mineralogica Sinica**, 1995-04.

Pontual, S.; Merry, N.; Gamson, P. **Spectral analysis guides for mineral exploration**. Spectral interpretation. Field manual, third ed. Victoria: AusSpec International Ltd., 2008, 189 p.

Reinitz, I.M.; Rossman, G.R. Role of natural radiation in tourmaline coloration. **American Mineralogist**, v. 73, n. 7-8, p. 822-825, 1988.

Rossman, G.R.; Fritsch, E.; Shigley, J.E. Origin of color in cuprian elbaite from São José de Batalha, Paraíba, Brazil. **American Mineralogist**, v. 76, n. 9-10, p. 1479-1484, 1991.

Silva, S.M.P. **Espectroscopia de imageamento e gamaespectrometria aérea e terrestre de pegmatitos e granitos da porção sul da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), Nordeste do Brasil**, 2009, 173p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Campinas, 2009.

Taran, M.N.; Lebedev A.S.; Platonov, A.N. Optical absorption spectroscopy of synthetic tourmalines. **Physics and Chemistry of Mineral**, v.20, n. 3, p. 209-220, 1993.

Thompson, A.J.B. ; Hauff, P.L. ; Robitaille, A.J. Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. **Society of Economic Geology Newsletter**, v. 39, 15-17, 1999.

van der Meer, F. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 5, n. 1, p. 55-68, 2004.

Zhang, A.; Wang, R.; Li, Y.; Hu, H.; Lu, X.; Ji, J.; Zhang, H. Tourmalines from the Koktokay No.3 pegmatite, Altai, NW China: spectroscopic characterization and relationships with the pegmatite evolution. **European Journal of Mineralogy**, v. 20, n. 1, p. 143-154, 2011.